

1300 nm 帯 GaInNAs 系高温特性レーザ

1300 nm-Range GaInNAs-Based MQW Lasers with High Characteristic Temperature

清水 均*
Hitoshi Shimizu

熊田 浩仁*
Kouji Kumada

内山 誠治*
Seiji Uchiyama

粕川 秋彦*²
Akihiko Kasukawa

概要 1.3 μm 帯の光加入者用光源や面発光レーザとして期待される, GaAs 基板上的 GaInNAs 系レーザの検討をガスソース MBE 法により行った。

GaInNAs に Sb を微量添加した GaInNAsSb レーザで, 波長 1.258 μm での室温 CW 動作を達成した。GaInNAs を用いたレーザでは過去の報告例中, 最も低いしきい値電流と同等であり, (12.4 mA@25), なおかつ, 高特性温度 ($T_0 = 157 \text{ K}$) で, 100 以上の高温まで CW 発振した。この特性は, これまで報告されている端面射出型 GaInNAs 系レーザの中で最高の特性である。また, 1.2 μm 帯 GaInAs 系レーザも, これまでの過去の報告例中, 最も低いしきい値電流 (6.3 mA) で, なおかつ, 高特性温度 ($T_0 = 256 \text{ K}$) で CW 発振した。GaInNAsSb レーザは, ペルチエフリーの光加入者用光源や面発光レーザ素子として非常に有望である。

1. はじめに

GaAs 基板上で発振する, 1.2 μm ~ 1.3 μm 帯レーザが大きな関心を集めている。材料としては, GaInNAs^{1)~3)}, GaInAs 量子薄膜 (QF), GaAsSb, InAs 量子ドット (QD) 等が報告されている。特に, GaInNAs 系は伝導体バンドオフセットが大きいため電子の閉じ込めが強く, 高い特性温度が理論予測されたり, 実験的に報告されている。通常の長波長帯の GaInAsP/InP 系では, 特性温度が 50 ~ 70 K であるが, GaInNAs 系では 130 K ~ 270 K の高特性温度が報告^{1),2)}されており, 1.3 μm 帯光加入者用光源として, ペルチエフリーの安価なシステムを実現できると期待されている。

また, GaAs 基板上的長波長帯面発光レーザ (VCSEL) に応用した場合, 熱抵抗が小さく反射率の高い GaAs/AlGaAs DBR ミラー上にモノリシックに GaInNAs 活性層を成長可能であり, AlAs 選択酸化等の 850 ~ 980 nm 帯レーザで築かれた優れた技術が使えるというメリットが有る。

しかしながら, これまでの GaInNAs 系レーザの外部研究機関による報告では, 結晶性の良いレーザを報告している所は少なかった。GaInNAs 系は準安定混晶であり, 最も非熱平衡状態で成長可能な分子線エピタキシー (MBE) 法がこの材料の成長に最も有利であると考えられる。

結晶性の良い, 1.3 μm 帯 GaInNAs 系レーザを作製するためには, フォトルミネッセンス強度が強い 1.2 μm 帯 GaInAs 量子

薄膜レーザに窒素を添加しなければいけない。なぜなら, 窒素を加えるほど, フォトルミネッセンス強度は弱くなるからである。これまでに, MBE 法により GaAs 基板上で波長 1.224 μm までの長波長化の報告はあるが, レーザ quality のものではなかった。ほとんどの MBE による量子薄膜を用いるレーザの報告では, 波長は 1.12 μm までに限定されていた。

GaInAs の波長を長くするために, 高 In 組成の GaInAs を MBE 成長で達成するためには, 成長速度を大きくしたり, 成長温度を低くしたり, V/III 比を上げたり, サーファクタントを使う方法⁴⁾が報告されている。この方法の中で, サーファクタントを用いる方法は, InGaAs 系では, Te のみがその効果を報告されている。一方, サーファクタントとしての Sb は Si/Ge 系や GaInNAs 系で報告されている。

本報告では, Sb を微量に含む GaInAsSb レーザと GaInNAsSb レーザをガスソース MBE 法により作製し, リッジレーザの特性を調べた。Sb はサーファクタントに類似した効果を有し, 2次元成長から3次元成長を始める臨界膜厚を増加させた。第2章では, GaInAs と GaInNAs 量子井戸のフォトルミネッセンス特性に及ぼす Sb の効果を調べた。GaInAs 系量子薄膜において, 波長 1.185 μm までの長波長化と 278 A/cm² という低 J_{th} 化を達成した⁵⁾。この値は, 1.2 μm 帯の GaInAs 量子薄膜レーザの報告において, 世界最高データの一つに値する。第3章ではリッジレーザを作製し, 内部損失, 利得係数, 特性温度等のレーザパラメータを抽出した。CW 駆動で波長 1.26 μm の低しきい値電流 (12.4 mA) かつ, 高特性温度 (157 K) を有する GaInNAsSb レーザと, CW 駆動で 1.20 μm の低しきい値電流 (6.3 mA) かつ, 高特性温度 (256 K) を有する GaInAsSb レーザの報告をする。

* 横浜研究所 半導体研究開発センター

*² 横浜研究所 WA チーム

2. MQWの作製と基本的な材料特性の評価

2.1 GaInAsの長波長化の検討

まず、我々は、GaInAs量子薄膜の長波長化を検討した。n-GaAs (100) 面基板にn-GaAsバッファ層 ($n = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) を0.2 μm , n-In_{0.48}Ga_{0.52}Pクラッド層 ($n = 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) を0.25 μm , GaAs光閉じ込め層を0.13 μm , Ga_{0.61}In_{0.39}As単一量子井戸活性層, GaAs光閉じ込め層を0.13 μm , p-In_{0.48}Ga_{0.52}Pクラッド層 ($p = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) を0.25 μm , この順番で成長した。

GaAs 基板上的 GaInAs に関して, J.W. Matthews と A.E. Blakeslee の臨界膜厚と In 組成の関係を計算により求めた。波長を長くするために, In 組成は 39% になるように設計した。Ga_{0.61}In_{0.39}As 単一量子井戸層は圧縮ひずみ 2.8% という非常に高ひずみ材料であり, この組成の臨界膜厚は 4 nm であるが, 波長を長くすることを考慮して量子井戸の設計膜厚は 7.3 nm とした。井戸層の成長温度は 440 °C, AsH₃ の流量は 9.5 torr (チャンバー圧力は $9.1 \times 10^{-5} \text{ torr}$), III 族の供給律速で決定される成長速度は 2.1 $\mu\text{m}/\text{h}$ に, それぞれ固定して実験を行った。

サーファクタントとしては Sb, Te, P 等がこれまでに報告されており, 高ひずみ系材料や準安定物質の 3 次元成長抑制方法として用いられる。サーファクタントとして機能させるには,

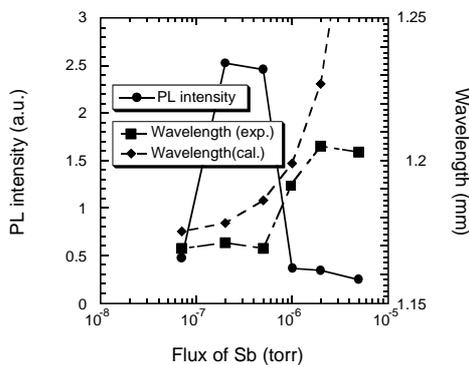


図1 GaInAsSb/GaAs SQWのPL強度及びPL波長とSbフラックス量との関係, PL波長の計算値も図中に示す。PL intensity and PL wavelength against Sb flux for GaInAsSb/GaAs SQW. The calculated wavelength where the incorporation rate of Sb is identical to that of GaAsSb was also shown.

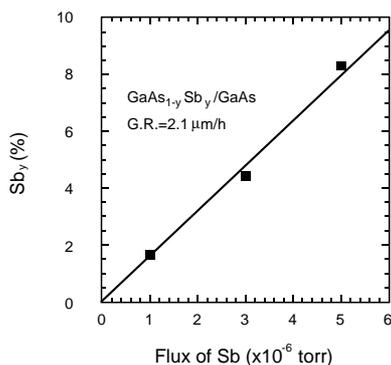


図2 GaAsSb中のSb組成とSbフラックスとの関係
Sb composition against Sb flux in GaAsSb on GaAs.

通常, 量子井戸層の前に1分子層程度のサーファクタントを添加しておく。するとサーファクタントが成長中常に最表面に存在し, 表面エネルギーを下げ, 表面拡散を抑制し, 3次元成長の発生を抑制する。我々は, Sbを井戸層の成長中に添加する方法をとった。

Sbを活性層中のみ添加して, Sbのフラックス量のフォトルミネッセンス(PL)依存性を調べた。図1にはPL強度及びPL波長のSbフラックス量依存性を示している。この図から, Sbは高ひずみGaInAsの成長において結晶性向上に有効であることがわかり, Sbを $2 \times 10^{-7} \text{ torr}$ 程度添加するのが最もPL強度が強くなり, 波長1.17 μm での強いPL発光を得ることができた。

Sbの膜への取り込み量を調べるために, GaAsSbバルクの成長を行った。その際に, 成長速度, AsH₃の流量, 成長温度をGaInAsSb井戸層と同一に設定した。Sbは, $5 \times 10^{-6} \text{ torr}$ のフラックスまで線型に膜に取り込まれた。この結果を図2に示す。このSb組成が, GaInAsSb中のSb組成と同一であると仮定してGaInAsSbの量子準位を計算した結果を図1に示す。

ここで, GaAs_ySb_{1-y}のエネルギーギャップとInAs_ySb_{1-y}のエネルギーギャップは以下の関係が求められている。

$$E_g(\text{GaAs}_y\text{Sb}_{1-y}) = 0.726 - 0.502y + 1.2y^2 \quad (1)$$

$$E_g(\text{InAs}_y\text{Sb}_{1-y}) = 0.18 - 0.41y + 0.58y^2 \quad (2)$$

この2つの材料から, Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}のエネルギーギャップはベガード則により

$$\begin{aligned} E_g(\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}) &= E_g(\text{GaAs}_y\text{Sb}_{1-y}) \times (1-x) + E_g(\text{InAs}_y\text{Sb}_{1-y}) \times x \\ &= x(0.726 - 0.502y + 1.2y^2) + (1-x)(0.18 - 0.41y + 0.58y^2) \quad (3) \end{aligned}$$

と求めることができる。

また計算の際, $\Delta E_c = 0.7\Delta E_g$ として計算した。Sbのフラックス量が $2 \times 10^{-6} \text{ torr}$ までは, 計算と比較的良好一致を示した。PLが最も強くなる $2 \times 10^{-7} \text{ torr}$ では, Ga_{0.61}In_{0.39}As_{0.9967}Sb_{0.0033}と, 微量のSbが膜に取り込まれることになる。これらのことから, Sbは膜中に取り込まれ, サーファクタントに類似した効果を有すると言える。すなわち, Sbは表面エネルギーを下げて表面拡散を抑制し, 3次元成長の発生を抑制していると考えられる。これまで, GaAs基板上的GaInAsに対するサーファクタントとしては, Teがその効果を確認されていたが, Sbがこの材料系でサーファクタントに類似した振舞いをし, 3次元成長を始める臨界膜厚が増加したことを確認したのは, 世界でこれが最初の報告である⁵⁾。

Sb = $5 \times 10^{-6} \text{ torr}$ では, GaAsSbと同量のSbがGaInAsSb中に取り込まれると仮定すると, Sb組成は8%となり圧縮歪量は3.41%にも達する。したがって, 転位の臨界膜厚を超えて計算が合わないのかもしれない。また, GaInAsSbは, ミシビリテ ィーギャップが存在するので440 °Cという成長温度では相分離が起きている可能性もあり, それが原因で波長が合わないのかもしれない。

2.2 GaInAsSbの成長検討

検討に用いたテスト構造は, 第2.1章とほぼ同一である。単一量子井戸をGa_{0.61}In_{0.39}N_{1-y1-y2}As_{y1}Sb_{y2}で構成することのみ異

なる。井戸層はSbが無い状態で圧縮ひずみ量は約2.7%であり、設計膜厚は7.3 nmとした。窒素は、RFにより励起した窒素ラジカルを原料としている。活性層の成長温度を460 °C、AsH₃流量を9.5 torr、井戸層の成長速度は2.1 μm/hに、N流量は0.05 ccmにそれぞれ固定して実験を行った。

また、結晶性を回復させるために、成長後に窒素雰囲気中で半絶縁性GaAs ウエハーをAs 抜け防止キャップとして650 °Cで

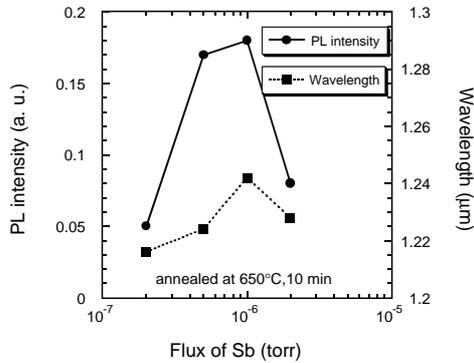


図3 GaInNAsSb/GaAs SQW に対する PL 強度及び PL 波長と Sb フラックスとの関係
PL intensity and PL wavelength against Sb flux for GaInNAsSb/GaAs SQW.

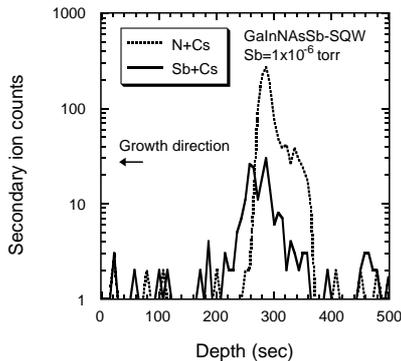


図4 Sb を 1×10^{-6} torr 照射時の GaInNAsSb SQW レーザの SIMS プロファイル, N 信号 (Cs + N イオン) と Sb 信号 (Cs + Sb イオン) を表示している。
SIMS profile for GaInNAsSb SQW lasers with Sb flux of 1×10^{-6} torr, where N signal (Cs+N ion) and Sb signal (Cs+Sb ion) were shown.

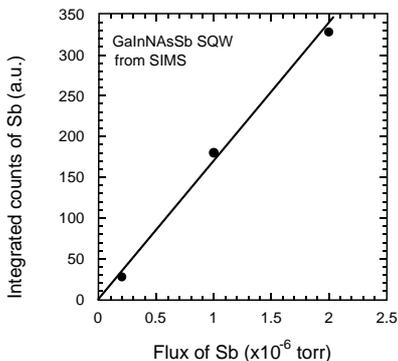


図5 SIMS プロファイルから求めた SQW 中の Sb の積分強度と Sb フラックス量との関係
The integrated intensity of Sb in SIMS profile against the flux of Sb.

10 分間アニールしている。

図3にPL強度とPL波長のSbフラックス量依存性を示す。この図から、 $Sb = 1 \times 10^{-6}$ torr 辺りがPL強度を強くするために最適であることがわかり、Sb組成は1.6%と見積もられる。

この条件での $Ga_{0.61}In_{0.39}As_{0.984}Sb_{0.016}$ 量子井戸と $Ga_{0.61}In_{0.39}N_{1-y}As_ySb_{0.016}$ 量子井戸の as-grown での PL 波長はそれぞれ、1.19 μm, 1.27 μm であり、N 添加により 0.08 μm 長波長化する。この波長シフト量から、本量子井戸は N 組成 0.44% と見積もられる。半値幅は 23 meV と、GaInAs 並みの狭い値が得られている。

また、Sb を全く基板に供給しない状態では、この組成 ($Ga_{0.61}In_{0.39}N_{0.0044}As_{0.9956}$) では全成長温度領域において半値幅が 200 meV 以上の PL 強度の弱い発光しか得られておらず、Sb の効果が大きいことがわかる。

GaInNAsSb SQW レーザの膜質を更に調べるために、二次イオン質量分析 (SIMS) 測定と透過電子顕微鏡 (TEM) 観察を、Sb の量を変化させたサンプルに関して調べた。図4はSbフラックス量 1×10^{-6} torr の GaInNAsSb SQW に関して N 信号 (N + Cs) と Sb 信号 (Sb + Cs) の SIMS を示している。これから Sb 信号の積分強度を計算して、Sb フラックス量との関係を示したものが図5である。Sb は GaInNAsSb SQW 層に 2×10^{-6} torr のフラックス量まで線形的に取り込まれた。

また、図6は 2×10^{-7} torr と 1×10^{-6} torr の Sb フラックス量で成長した GaInNAsSb の TEM 像をそれぞれ示している。PL から予想されたように、 2×10^{-7} torr の Sb フラックスで成長した SQW 層は3次元成長し、 1×10^{-6} torr の Sb フラックス量で成長した SQW はきれいに2次元成長している。Sb は GaInAs/GaAs 系と同様に GaInNAs/GaAs 系において、サーファクタントに類似した効果を有し、2次元成長から3次元成長へ変化する臨界膜厚を大きくできることがわかった。

つぎに、上記最適条件下で、PL 特性のアニール温度依存性を調べた。ここでは N 流量を若干減らしており、この SQW の N 組成は 0.33% と見積もられる。(すなわち、 $Ga_{0.61}In_{0.39}As_{0.9807}N_{0.0033}Sb_{0.016}$ と) これを図7に示す。この図から、550 °C のアニールで結晶性はほぼ回復することがわかる。このときの PL 波長は 1.23 μm、半値幅は 23 meV であった。

2.3 GaInAsSb, GaInNAsSb SQW レーザのプロードレーザによる評価

上記で検討した最適条件下での活性層成長条件で、 $Ga_{0.61}In_{0.39}As_{0.9968}Sb_{0.0032}/GaAs$ -SQW レーザと、 $Ga_{0.61}In_{0.39}N_{0.0033}As_{0.9807}Sb_{0.016}/GaAs$ -SQW レーザを全 GSMBE により作製した。

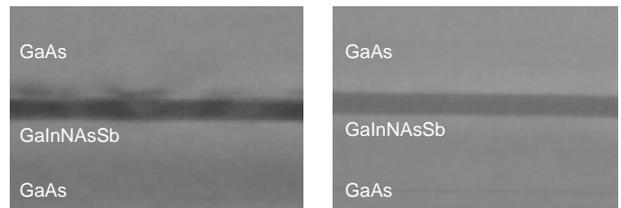


図6 Sb フラックス量が 2×10^{-7} torr のときの TEM 像 (a) と、 1×10^{-6} torr のときの TEM 像 (b)
TEM images for GaInNAsSb-SQW lasers with Sb flux of 2×10^{-7} torr (a) and 1×10^{-6} torr (b), respectively.

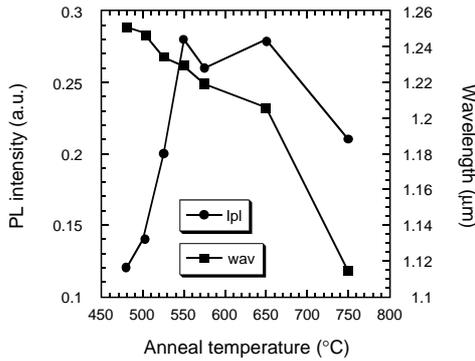


図7 GaInNAsSb-SQW レーザのPL強度とPL波長に及ぼす熱処理の効果
The effect of annealing on the PL intensities and PL wavelength for GaInNAsSb-SQW lasers.

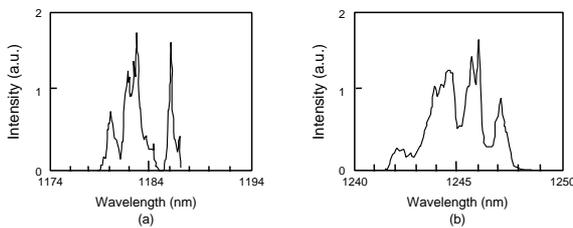


図8 GaInAsSb SQW レーザ (a) と GaInNAsSb SQW レーザ (b) のブロードレーザの発振スペクトル
The lasing spectrum for the broad contact lasers with 600- μm cavity for GaInAsSb SQW laser (a), and GaInNAsSb SQW laser (b).

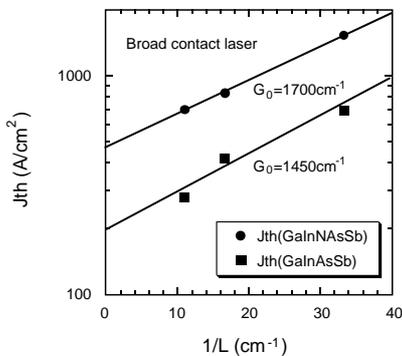


図9 GaInAsSb SQW レーザと GaInNAsSb SQW レーザの J_{th} と共振器長の関係
 J_{th} against inverse cavity length for broad contact lasers of GaInAsSb and GaInNAsSb SQW lasers.

活性層近くの構造は2章で述べた構造と同じである。InGaP クラッド層は膜厚 $1.5 \mu\text{m}$ とし、p-GaAs コンタクト層 ($p = 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) を最後に成長している。

ブロードコンタクトレーザを作製し、 J_{th} の評価を行った。

図8 (a), (b) にそれぞれ GaInAsSb-SQW, GaInNAsSb-SQW レーザの共振器長 $600 \mu\text{m}$ (CL/CL) での発振スペクトルを示す。それぞれ、波長 $1.185 \mu\text{m}$, $1.246 \mu\text{m}$ で発振した。

図9にはそれぞれ GaInAsSb-SQW, GaInNAsSb-SQW レーザの J_{th} と共振器長の実験結果を計算フィッティングと共に示す。共振器長 $900 \mu\text{m}$ で、GaInAsSb-SQW レーザ, GaInNAsSb-SQW レーザ、それぞれの J_{th} は、 278 A/cm^2 , 704 A/cm^2 という、良

好な値が得られた。これまでに報告されている $1.2 \mu\text{m}$ 帯 GaInAs レーザ²⁾は $J_{th} = 200 \sim 300 \text{ A/cm}^2$, $1.25 \sim 1.3 \mu\text{m}$ 帯 GaInNAs レーザ^{2), 3)}は、 $J_{th} = 270 \sim 1000 \text{ A/cm}^2$ であるので、良好な結果が得られたとすることができる。

J_{th} は以下の式で書き表せる。

$$J_{th} = \frac{N_w J_{tr}}{\eta} \exp \frac{\alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_f R_r} \right)}{N_w \xi_w G_0} \quad (4)$$

ここで、 J_{tr} は透明化電流密度、 η はしきい値における自然放光の電流注入効率、 N_w は井戸数、 α_i は内部損失、 L は共振器長、 R_f は前端面の反射率、 R_r は後端面の反射率、 ξ_w は1井戸当たりの光閉じ込め係数、 G_0 は利得係数である。

また、計算から、波長 $1.25 \mu\text{m}$ に対する GaAs, InGaP の屈折率は、それぞれ 3.456 , 3.172 と、求まる。GaInNAsSb の屈折率を 3.52 と仮定すると、光閉じ込め係数は 1.978% となる。図9においてフィッティングを行うと、GaInNAsSb の G_0 は 1700 cm^{-1} となる。同様に、GaInAsSb レーザの光閉じ込め係数は 1.985% となる。図9においてフィッティングを行うと、GaInAsSb の G_0 は 1450 cm^{-1} となる。GaInNAsSb レーザは GaInAsSb レーザよりも G_0 が約 1.2 倍大きく、 T_0 の増加が期待できる。

3. リッジレーザの特性評価

素子構造は、逆メサ方向にストライプを形成したリッジレーザを作製した。n-InGaP クラッド層と GaAs 光閉じ込め層の界面までエッチングを行った構造としている。

GaAs のエッチングには酒石酸:過酸化水素 = $20:1$ の混合溶液を用い、InGaP のエッチングには、 100% の HCl を用いている。リッジ下部の幅としては、 $4 \sim 4.5 \mu\text{m}$ 程度としている。

3.1 しきい値電流と各レーザパラメータの評価

まず、両端面 as-cleave 素子の外部微分量子効率の共振器長依存性から内部損失と内部効率を見積もった。GaInAsSb レーザと GaInNAsSb レーザ共に、内部効率は 100% 、内部損失は 7 cm^{-1} と求まった。また、第2章の、ブロードレーザのしきい値電流密度 (J_{th}) の共振器長依存性において、式(4)にこの内部損失を代入してフィッティングすると、 J_{tr}/η は GaInAsSb, GaInNAsSb レーザでそれぞれ 150 A/cm^2 , 380 A/cm^2 と求まる。ここで GaInNAsSb レーザの J_{th}/η は GaInAsSb に比べて約 2.5 倍大きい。これは主として GaInNAsSb レーザの η が小さいためである。今後、QW の成長条件の更なる改善により η を増加すれば、 J_{th} の低減が期待できる。

共振器長を L 、リッジ下部の幅を W とすると、リッジレーザのしきい値電流は以下の式で書き表せる。

$$J_{th} = WL \frac{N_w J_{tr}}{\eta} \exp \frac{\alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_f R_r} \right)}{\xi_w N_w G_0} + I_1 L + I_2 \quad (5)$$

ここで $I_1 L + I_2$ は、リーク電流である。 I_1, I_2 は、 980 nm 帯の InGaAs/AlGaAs 系リッジレーザのリーク電流解析で得られ

ている値を参考にした。 I_2 は論文値と同一にして ($I_2 = 0.78$ mA), I_1 が共振器長 300, 600, 900 μm の両端面 as-cleave 素子のしきい値電流結果にフィッティングするように設定した。 I_1 は, GaInAsSb, GaInNAsSb レーザでそれぞれ, 1.3×10^{-2} mA/ μm , 2×10^{-2} mA/ μm とした。

しきい値電流の理論予測値と実験値をプロットしたものを GaInAsSb に関しては図 10 に, GaInNAsSb に関しては図 11 に示す。GaInAsSb レーザは共振器長 300 μm , 600 μm , 900 μm においてそれぞれしきい値電流は, 12.5 mA, 20 mA, 26 mA が得られた。GaInNAsSb レーザでは共振器長 300 μm , 600 μm , 900 μm においてそれぞれしきい値電流は, 25 mA, 35 mA, 47 mA が得られた。また, 共振器長 200 μm , 両端面高反射膜 ($\text{SiO}_2/\alpha\text{-Si}$; 78/95%) を施したレーザでは, 室温パルスにおいて, 測定した中での最小値としては GaInNAsSb レーザで 9.5 mA, GaInAsSb レーザで 6 mA という, それぞれの材料系でこれまでの報告中最も低い値が得られた。ここで, CL/HR, HR/HR の素子の I_{th} は理論曲線と良く一致することに注意していただきたい。

図 12 (a), (b) には, 共振器長 300 μm , CL/95% の素子に

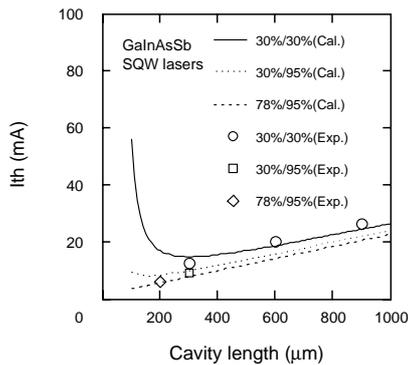


図 10 GaInAsSb SQW レーザのしきい値電流と共振器長の関係, 端面反射率をパラメータとしている。
 I_{th} against cavity length for GaInAsSb SQW lasers with a parameter of facet reflectivity. The lines are theoretical curves calculated by the equation (5).

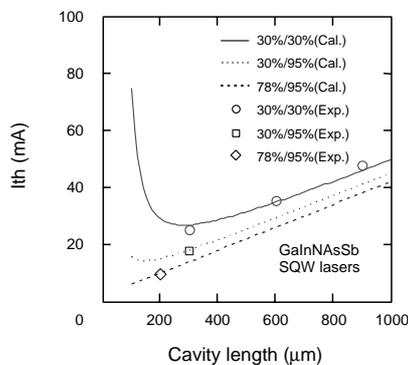


図 11 GaInNAsSb SQW レーザのしきい値電流と共振器長の関係, 端面反射率をパラメータとしている。
 I_{th} against cavity length for GaInNAsSb SQW lasers with a parameter of facet reflectivity. The lines are theoretical curves calculated by equation (5)

関して, それぞれ, GaInAsSb と GaInNAsSb レーザのパルス駆動における L-I 曲線の温度特性を示した。25 におけるそれぞれのスロープ効率は, GaInAsSb, GaInNAsSb レーザそれぞれ, 0.46 W/A, 0.44 W/A であった。GaInAsSb レーザは 145 まで発振し, GaInNAsSb レーザは 95 まで発振した。この素子に関して, I_{th} の温度依存性を図 13 に比較する。特性温度は GaInAsSb と GaInNAsSb でそれぞれ, 120 K (@25 ~ 125), 111 K (@25 ~ 85) であった。図 14 には, スロープ効率の

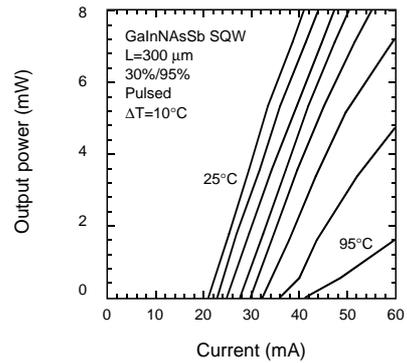
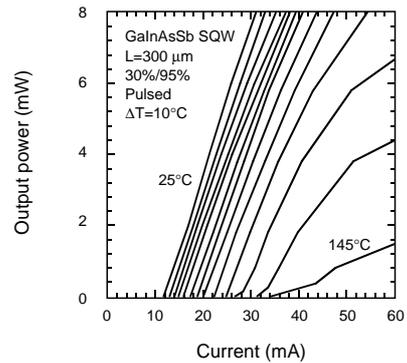


図 12 GaInAsSb レーザ (a) と GaInNAsSb レーザ (b) のパルス駆動における L-I 曲線の温度依存性 ($L = 300 \mu\text{m}$, 30/95%)
The temperature dependence of light-current characteristics for GaInAsSb lasers (a), and GaInNAsSb lasers (b) under pulsed operation ($L=300 \mu\text{m}$, 30/95%).

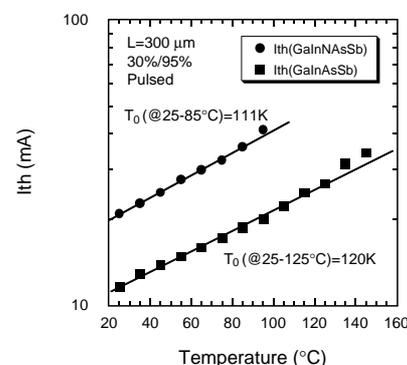


図 13 GaInAsSb SQW レーザと GaInNAsSb SQW レーザのパルス駆動におけるしきい値電流の温度依存性 ($L = 300 \mu\text{m}$, 30/95%)
The temperature dependence of the threshold currents for GaInAsSb and GaInNAsSb SQW lasers under pulsed operation ($L=300 \mu\text{m}$, 30/95%).

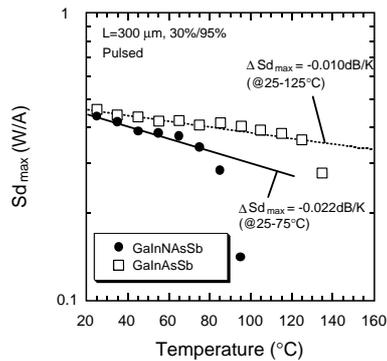


図 14 GaInAsSb SQW レーザと GaInNAsSb SQW レーザの、パルス駆動におけるスロープ効率の温度依存性 ($L = 300 \mu\text{m}$, 30%/95%)
The temperature dependence of the slope efficiency for GaInAsSb and GaInNAsSb SQW lasers under pulse operation ($L=300 \mu\text{m}$, 30%/95%).

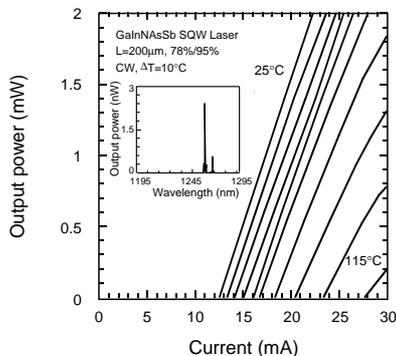


図 15 CW 駆動における GaInNAsSb レーザの L-I 曲線の温度依存性 ($L = 200 \mu\text{m}$, 78%/95%), 発振スペクトルも同時に示す。
The temperature dependence of light-current characteristics for GaInNAsSb lasers under CW operation ($L = 200 \mu\text{m}$, 78%/95%). The inset shows lasing spectrum at room temperature.

温度依存性を比較する。スロープ効率の温度依存性は、GaInAsSb と GaInNAsSb でそれぞれ、 -0.010 dB/K ($@25 \sim 125$), -0.022 dB/K ($@25 \sim 75$) であった。GaInNAsSb レーザは GaInAsSb レーザよりも深い電子の閉じ込めを有しているにもかかわらず、温度特性は GaInAsSb レーザよりも劣るが、これは、光学特性がまだ良くないことに起因していると考えられ、光学特性の改善により、GaInNAsSb レーザは GaInAsSb 並みの良好な温度特性を有することが期待できる。

3.2 リッジレーザの DC 特性

共振器長 $200 \mu\text{m}$ 、両端面高反射膜 (78%/95%) を施したレーザにおける DC 特性を調べた。まず発振スペクトルを図 15 の挿絵に示す。GaInNAsSb レーザは波長 $1.258 \mu\text{m}$ 、GaInAsSb レーザは、 $1.195 \mu\text{m}$ で室温 CW 発振した。つぎに、DC 動作における GaInNAsSb レーザの L-I 特性の温度依存性を図 15 に示す。25 °C でのしきい値電流は 12.4 mA 、スロープ効率 0.22 W/A 、そして、 $25 \sim 85$ °C における特性温度は 157 K と高く、スロープ効率の温度変化は -0.014 dB/K ($@25 \sim 85$ °C) と優れ、 100 °C 以上の高温でも CW 発振した。GaInAsSb レーザでは DC

駆動において、更に低しきい値 ($6.3 \text{ mA}@20$ °C)、かつ高特性温度 ($256 \text{ K}@20 \sim 70$ °C) が得られた。

これまでに GaInNAs を用いた端面出射型レーザに関して、しきい値電流が最も低い値は、ドイツの Infineon 社から報告されている 11 mA (波長 $1.28 \mu\text{m}$, パルス駆動)³⁾ であるが、今回はそれと同等の低しきい値動作が得られた。また、彼らの報告では、特性温度が $70 \sim 80 \text{ K}$ と低いので、低しきい値かつ高い特性温度を有する GaInNAs 系レーザとしては本報告が best data と言うことができる⁶⁾。また、 $1.2 \mu\text{m}$ 帯高歪 GaInAs 系レーザとしては、東工大が先行しているが、しきい値電流としては 16 mA 、特性温度として 140 K の報告をしているので、この波長帯の GaInAs 系量子薄膜レーザに関して本報告は best data と言うことができる。これらの結果から、GaInNAsSb レーザは、ペルチエフリーの光加入用光源や VCSEL 素子として非常に有望である。

4. まとめ

$1.3 \mu\text{m}$ 帯の光加入用光源や面発光レーザとして期待される、GaAs 基板上的 GaInNAs 系レーザの検討をガスソース MBE 法により行った。

Sb を微量含んだ長波長帯 GaInNAsSb-SQW レーザと GaInAsSb-SQW レーザを検討し、Sb は GaInNAs 系と高ひずみ GaInAs 系でサーファクタントに類似した効果を示した。すなわち、微量に組成として添加した Sb により、成長モードが 2 次元成長から 3 次元成長に変化する臨界膜厚を大きくすることができた。

リッジレーザを作製し、GaInNAsSb レーザで、波長 $1.258 \mu\text{m}$ での室温 CW 動作を達成した。GaInNAs を用いたレーザでは過去の報告例中、最も低いしきい値電流 (12.4 mA) で、なおかつ、高特性温度 ($T_0 = 157 \text{ K}$) で、 100 °C 以上の高温まで CW 発振した。この特性は、これまで報告されている端面出射型 GaInNAs 系レーザの中で最高の特性である。GaInNAsSb レーザは、ペルチエフリーの光加入用光源や VCSEL 素子として非常に有望であると言える。

また、 $1.2 \mu\text{m}$ 帯 GaInAs 系レーザも、これまでの過去の報告例中、最も低いしきい値電流 (6.3 mA) で、なおかつ、高特性温度 ($T_0 = 256 \text{ K}$) で CW 発振した。

参考文献

- 1) M. Kondow et al., Jpn. J. Appl. Phys., vol.35, p.5711, 1996.
- 2) S. Sato et al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol.11, p.1560, 1999.
- 3) S. Illek et al., Electron. Lett., vol.36, p.725, 2000.
- 4) M. Copel et al., Phys. Rev. Lett., vol.63, p.632, 1989.
- 5) H. Shimizu et al., Electron. Lett., vol.36, p.1379, 2000.
- 6) H. Shimizu et al., Electron. Lett., vol.36, p.1701, 2000.